

Radio Nederland



Introduction

La radio en ondes courtes se différencie totalement de toute autre forme de radiodiffusion ou de télédiffusion, car les longueurs d'ondes ou les fréquences utilisées en ondes courtes peuvent changer de façon instantanée pendant l'année et parfois même au cours d'une journée. L'écoute des ondes courtes peut être insupportable pour certaines personnes habituées à synchroniser leurs habitudes préférées de radio ou de télévision que ce soit en ondes longues, ondes moyennes, en FM (modulation de fréquence) ou VHF (Très hautes fréquences). La

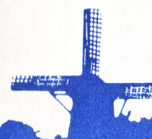
COURS DE PROPAGATION DES ONDES COURTES

Jim Vastenhoud

En plus des prévisions concernant la propagation de nos ondes au premier plan les phénomènes susceptibles de nuire à la réception des ondes courtes vont être présentés de manière à rendre complètement impossible.

A la fin de ce cours, vous recevrez les réponses aux questions que vous vous posez.

Si vous désirez recevoir un complément d'information ou des conseils, écrivez-nous.



B.P. 222
1200 JG Hilversum
Pays-Bas

Traduction: Eric Beauchemin, Huguette Soumoy
Mise en page: Jaime Báguena
Imprimerie: Huisdrukkerij Radio Nederland Wereldomroep

Toute reproduction, par quelque procédé que ce soit, faite sans l'autorisation préalable de cette station est strictement interdite.

Radio Nederland Wereldomroep
Copyright © 1988

Introduction

La radio en ondes courtes se différencie totalement de toute autre forme de radiodiffusion voire de télédiffusion, car les longueurs d'ondes ou les fréquences utilisées en ondes courtes peuvent changer de façon inattendue pendant l'année et parfois même au cours d'une journée. L'écoute des ondes courtes peut être insaisissable et dérouter les personnes habituées à syntoniser leurs stations préférées de radio ou de télévision que ce soit en ondes longues, ondes moyennes, en FM (modulation de fréquence) ou VHF (Très hautes fréquences). La modification des fréquences est quelque chose d'inévitable pour la radio en ondes courtes.

Ce phénomène se doit à ce qu'on appelle: la propagation des ondes courtes.

Ce cours tente d'expliquer ce phénomène et de vous aider à trouver les bandes dans lesquelles - avec une certaine précision - vous pourrez vous attendre à trouver la station que vous désirez écouter et le meilleur moment de la journée pour la syntoniser.

En plus des prévisions concernant la propagation, ce cours met au premier plan les phénomènes susceptibles de nuire à la réception des ondes courtes voire qui pourraient la rendre complètement impossible.

A la fin de ce cours, vous trouverez les réponses aux questions proposées à la fin des leçons.

Si vous désirez recevoir un complément d'information, n'hésitez pas à nous en faire la demande.

Hilversum, août 1988

Département Afrique
Radio Nederland
Boîte Postale 222
1200 JG Hilversum
PAYS-BAS

1 Le Soleil

Le Soleil est une étoile, l'étoile la plus proche de la Terre. Il est d'une importance capitale car il fournit la lumière, la chaleur, et l'énergie sans lesquelles la vie sur Terre serait impossible. Le Soleil se trouve au centre de notre système solaire, qui inclut aussi la Terre, et d'autres planètes bien connues comme Jupiter, Vénus et Mars, qui tournent autour du Soleil à des distances différentes.

Le diamètre du disque solaire est d'environ 1,5 millions de kilomètres, c'est-à-dire environ cent fois celui de la Terre. Sa distance moyenne de la Terre est de 150 millions de kilomètres. Mercure et Vénus sont les plus proches du Soleil. La Terre vient en troisième position. Quant à la planète Mars, elle se trouve sur une orbite plus éloignée du Soleil que celle de la Terre.

Le Soleil est un corps entièrement gazeux qui émet constamment de la lumière ainsi que d'autres radiations. La température à sa surface est proche de 6000 degrés Kelvin (l'échelle Kelvin = l'échelle Centigrade plus 273 degrés). La lumière est irradiée dans toutes les directions, et sa vitesse de propagation est de 300.000 kilomètres à la seconde. Même à cette vitesse, la lumière du Soleil prend environ 8,5 minutes pour arriver jusqu'à la Terre.

Comme vous le savez, la Terre tourne autour de son axe en 24 heures, et le côté qui fait face au Soleil reçoit la lumière du jour alors que le côté opposé reste dans l'obscurité.

Le Soleil tourne aussi autour de son axe, mais un peu plus lentement: 27 jours pour une rotation. Il est important que nous sachions ceci parce que nous pouvons nous attendre à ce que les phénomènes qui persistent à la surface du Soleil se répètent tous les 27 jours. Le Soleil est aussi un aimant immense, avec un champ magnétique extérieur puissant et des courants magnétiques intenses à l'intérieur de sa masse. Parfois ces courants crèvent la surface, qui se refroidit alors localement, et qui apparaît (pour nous sur Terre) comme une tache sombre, connue sous le nom de tache solaire, dont la taille normale est équivalente à celle de la Terre. Ceci nous donne une petite idée de l'énorme quantité d'énergie qui entre en jeu quand le champ magnétique interne du Soleil perce sa surface. Les grandes taches solaires peuvent avoir jusqu'à huit fois la grandeur de la Terre. Des masses considérables d'énergie en échappent, dont de grandes quantités d'ondes violettes et ultraviolettes. C'est surtout cette dernière qui est d'une importance spéciale pour la propagation des ondes courtes et nous y reviendrons plus tard.

Les taches solaires avaient déjà été observées au 17ème siècle. Mais c'est l'astronome suisse Rudolf Wolf qui les a examinées minutieusement et a coordonné les données recueillies au cours des siècles. Il a découvert la périodicité de 11 ans de l'activité solaire, c'est-à-dire le fait que le nombre de taches et leur taille varient entre un minimum et un maximum et de nouveau un minimum (connu sous le nom de cycle d'activité du Soleil).

Pendant les périodes d'activité solaire intense, on observe à la surface du Soleil des groupes de petites taches ou de grandes taches isolées, ou une combinaison des deux, et par conséquent une grande quantité de la masse excédente et de la radiation s'échappent, affectant les communications d'ondes courtes sur Terre. Wolf a classifié les taches solaires et a

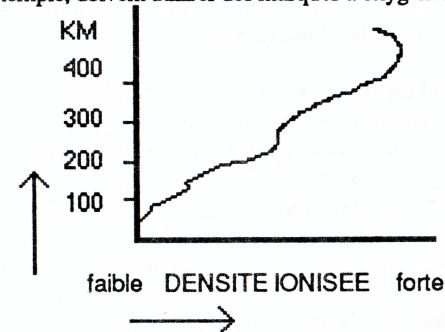
introduit un système compteur, connu comme le chiffre de Wolf ou de taches solaires. Pendant une faible activité solaire, la valeur moyenne s'approche de zéro. Pendant une activité solaire intense, le nombre (R) de taches solaires, peut avoir une moyenne mensuelle de 150. En 1959, l'activité solaire était extrêmement élevée, et à plusieurs occasions elle a atteint le nombre 200. La dernière période maximale en décembre 1979 a été de R=165. L'influence directe de l'activité solaire sur les émissions en ondes courtes sur Terre sera examinée dans la troisième leçon.

› Qu'est-ce qu'une tache solaire? Quel genre d'énergie s'en échappe?

2 La Terre et son ionosphère

La vie terrestre est protégée contre les rudes conditions des différentes régions de l'atmosphère par une couche d'air. Cette couche d'air est très fine: à une altitude de quelques kilomètres nous avons déjà des difficultés à respirer. C'est pour cette raison que les alpinistes du Mont Everest, par exemple, doivent utiliser des masques à oxygène.

Figure 1



Ce processus de raréfaction de l'atmosphère s'intensifie au fur et à mesure que l'altitude devient plus élevée, et se termine, comme nous le savons par les voyages spatiaux habités, dans un vide absolu. A des altitudes allant de 50 à 500 kilomètres, l'air est tellement raréfié que la radiation provenant de l'espace, surtout la radiation solaire, peut facilement ioniser le gaz restant. Cette région est donc appelée l'ionosphère. Dans ce processus d'ionisation, les atomes de gaz perdent un ou plusieurs de leurs électrons et se convertissent en ions (un ion est un atome incomplet parce qu'il a gagné ou perdu des électrons, un processus qui lui donne une charge positive ou négative). Si nous regardons le graphique qui indique la densité ionique au-dessus de la Terre à des altitudes différentes (Figure 1), nous constatons qu'elle varie considérablement en fonction de l'altitude, et que de plus, sa forme est irrégulière. A certaines altitudes on trouve des concentrations évidentes d'ions ou, si vous voulez, d'électrons. En d'autres termes, au-dessus de la Terre on trouve différentes couches ionisées.

La couche la plus proche de nous est la couche D ou la région D qui se trouve environ entre 50 et 90 kilomètres au-dessus de la Terre. Elle possède un faible degré d'ionisation, et les fréquences d'ondes courtes (hautes fréquences, en abrégé HF) la pénètrent facilement. Elle se comporte comme un absorbant pour les ondes moyennes, limitant leur portée pendant la journée et reflétant les fréquences basses et très basses. Elle ne subsiste que pendant la

journée quand elle est soumise à la radiation directe du Soleil. Bien que les signaux de haute fréquence (ou à ondes décamétriques) puissent facilement s'y introduire, comme nous l'avons dit, elle affaiblit un peu ces signaux par une légère absorption et dispersion.

A une altitude d'un peu plus de 100 kilomètres, nous trouvons la couche E (appelée autrefois la couche d'Heaviside). La concentration d'électrons ici dépend largement de l'incidence de la lumière solaire, bien qu'elle ne disparaisse pas complètement après le coucher du Soleil.

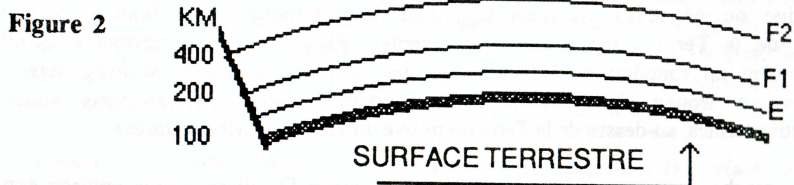
Toujours au sujet de la couche E, on trouve qu'elle est responsable de la propagation des ondes moyennes pendant la soirée et la nuit sur des distances supérieures à 250 kilomètres, et souvent aussi de la propagation (pendant la journée) de la bande inférieure d'ondes courtes sur des distances de moins de 2000 kilomètres. Elle joue le rôle d'autre absorbant pour la propagation de fréquence normale, c'est-à-dire des ondes qui pénètrent la couche E quand l'ionisation est insuffisante. Par conséquent, il y a une perte partielle de signaux par absorption et dispersion. Néanmoins, après le coucher du Soleil, l'importance de cette couche pour la propagation des ondes courtes décline rapidement.

Il faudrait aussi mentionner la couche E_s, ou la couche E sporadique, des formations irrégulières de nuages d'un degré d'ionisation exceptionnellement élevé qui se trouvent parfois à des altitudes un peu au-dessus de la couche E. Comme elles ont un effet perturbateur sur la propagation en ondes courtes, nous y reviendrons plus tard.

A une altitude d'environ 200 kilomètres se trouve la couche F₁, qui est présente pendant la journée. Elle a les mêmes caractéristiques que la couche E, mais elle se trouve à une altitude supérieure qui se confond avec la couche F₂ pendant la nuit. L'importance de la couche F₁ n'est pas très grande parce qu'elle est pénétrée par les ondes qui peuvent aussi traverser la couche E et parce que, comme nous l'avons dit, elle n'est présente que pendant la journée.

La plus importante couche ionosphérique pour la propagation des ondes courtes est la couche F₂ (appelée autrefois la couche d'Appelton), qui se trouve à des altitudes variant entre 250 et 400 kilomètres. Nous y reviendrons dans la leçon suivante.

Nous sommes maintenant en mesure de rassembler les données dans un diagramme (Figure 2), qui montre les différentes couches ionisées au-dessus de la Terre. Les variations dans le degré d'ionisation dans une période de 24 heures sont appelées des variations diurnes. Il est évident que pour certaines régions du monde, elles dépendent de certains éléments comme le moment de la journée ou de la nuit, et de la saison. La quantité de lumière quotidienne et l'apogée du Soleil à midi dépendent aussi de la saison.



> Citez les couches ionosphériques en-dessous de la couche F₂ qui disparaissent après le coucher du Soleil.

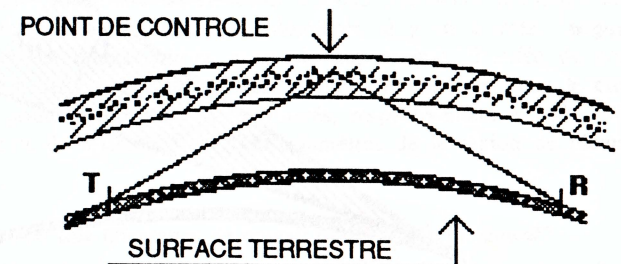
3 La couche F₂

La couche F₂ est la principale région réfléchissante pour la radiodiffusion à ondes décamétriques à longue distance. Son haut niveau d'ionisation lui donne la possibilité de réfléchir les ondes vers la Terre. L'ionisation à cette altitude (250 à 400 kilomètres, qui dépend de l'heure de la journée, de la saison et de l'altitude sur Terre) se doit principalement à la radiation ultraviolette du Soleil. Cependant en raison de la densité extrêmement basse de l'air, empêchant une reconversion rapide des électrons et des ions libres, la couche est capable d'amasser l'énergie reçue du Soleil pendant plusieurs heures. Pour cette raison, il n'y a pas de différences énormes entre ses propriétés de réfraction pendant la journée ou la nuit. En fait, son degré d'ionisation diminue lentement pendant la nuit, et n'a besoin que de quelques heures après le lever du soleil pour se rétablir.

Une connaissance de cette couche est d'une importance capitale pour comprendre la propagation des ondes courtes. Des études approfondies ont été menées pendant des années pour connaître le comportement de cette couche. Elle est influencée par l'heure, la saison, et l'activité solaire; le niveau d'ionisation augmente lorsque le Soleil est élevé et l'activité solaire est intense, car une grande quantité de radiation ultraviolette stimule l'ionisation. Or les propriétés de réfraction de la couche dépendent du niveau d'ionisation.

Comment pourrions-nous visualiser ce processus de réflexion ou de réfraction des ondes radio? Eh bien, un exemple optique pourrait être utile. Prenons les ondes lumineuses. C'est un phénomène connu que les ondes lumineuses, ou la lumière, sont réfléchies quand elles passent à travers une autre matière. Quand les ondes lumineuses propagées dans l'air atteignent une matière comme le verre ou l'eau, elles sont réfléchies. Ceci peut être vérifié en immergeant un bâton dans un seau d'eau. Vous verrez que le bâton a l'air de se courber à la surface. Cet effet est dû à la réfraction de la lumière. La même chose se produit avec la propagation HF. Dans la couche ionisée, la densité électronique varie constamment (voir la Figure 1), et l'indice de réfraction du matériel est donc variable. Ceci signifie que les propriétés réfléchissantes de la couche sont dues à une grande quantité de petites réflexions. La trajectoire que suit le signal d'ondes courtes à travers la couche F₂ est en réalité une courbe (Figure 3). Le degré de la courbe dépend de l'angle d'incidence des ondes, du niveau d'ionisation de la couche, et de la fréquence du signal. Un de ces facteurs, le niveau d'ionisation, est hors de notre contrôle. Donc le choix des fréquences pour la propagation des ondes courtes doit "être adapté" avec la connaissance des propriétés de l'antenne d'émission (diagramme de rayonnement) et de la fréquence la plus élevée qui sera encore réfléchi par l'ionosphère.

Figure 3



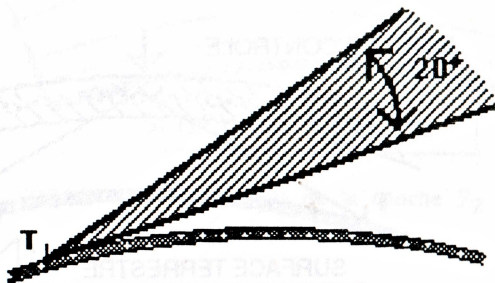
Pour pouvoir réaliser des prévisions exactes des fréquences utilisables par les stations émettant en ondes courtes, il existe un réseau mondial de stations de sondage ionosphérique. Elles contiennent un émetteur et un récepteur, en combinaison avec une antenne qui rayonne directement vers le ciel. Avec ce dispositif, il est possible de déterminer l'altitude de l'ionosphère et la fréquence maximale qui est encore réfléchiée avec une incidence verticale. Cette fréquence maximale pour la couche F_2 est appelée la fréquence critique (f_c). Avec ces données il est facile de réaliser le calcul des propriétés de réfraction avec une incidence oblique.

Pour les communications à longue distance, les antennes d'émission dirigent leur radiation presque parallèlement à la Terre, aussi peu élevée que possible, car de cette façon la plus grande distance est couverte en une seule réflexion. La forme sphérique de la Terre permet au rayon de "décoller" lentement, et ensuite de heurter la couche F_2 à un point situé environ 2000 kilomètres de l'émetteur. Ce point s'appelle le point de réflexion ou de contrôle, et il se trouve à mi-chemin entre l'émetteur et le point d'"atterrissage" du signal. La plus grande distance qui peut être couverte dans un "bond" isolé est 4000 kilomètres. La propagation est déterminée par les propriétés de réfraction au point de contrôle, situé à 2000 kilomètres de l'émetteur.

4 Un autre aspect de la réalisation pratique de la radiodiffusion en ondes courtes

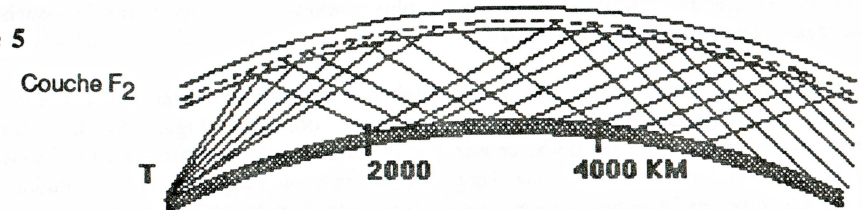
Dans la leçon précédente, il était question de la transmission ionosphérique en un bond isolé, couvrant une distance maximale de 4000 kilomètres quand l'antenne d'émission dirige le signal légèrement au-dessus de la surface terrestre. En vertu des dimensions physiques des longueurs d'ondes utilisées et donc de l'effet directionnel limité de l'antenne, son rayon a généralement une largeur relativement grande, aussi bien sur le plan horizontal que sur le plan vertical (Figure 4). Ceci nous permet d'utiliser la même antenne dans la même position pour des distances entre 2500 et 4000 kilomètres. On doit employer des antennes avec des diagrammes de rayonnement différents pour couvrir des distances plus proches. La radiation se propage maintenant dans une direction plus verticale, et heurte l'ionosphère à un angle tel qu'une pénétration aura lieu si la fréquence choisie est trop élevée. Ceci se comprend facilement car le chemin à travers l'ionosphère est plus court quand la radiation arrive à une inclinaison forte, ce qui affaiblira l'efficacité de la réfraction. Dans de telles circonstances, seules les fréquences basses seront réfléchies à la Terre (voir la Leçon 12).

Figure 4



Les distances supérieures à 4000 kilomètres ne peuvent pas être couvertes avec une transmission à "bond isolé" et donc ici apparaît la transmission à "multiples bonds". Le signal rebondit entre la Terre et l'ionosphère (Figure 5). Sa portée est limitée par l'absorption et par la diffusion auxquelles elle est soumise quand elle rebondit contre la Terre et quand elle atteint les parties inférieures de l'ionosphère. La planète semble être un bon réflecteur des ondes courtes et l'effet de diffusion est limité quand le signal touche la mer. Heureusement, l'eau recouvre les 75% de la superficie de notre planète.

Figure 5



S'il n'y avait pas d'absorption sur la trajectoire suivie par le signal, il ferait le tour de la Terre indéfiniment. Néanmoins ceci est faux, car l'absorption prend une partie tellement importante du signal que nous avons des difficultés à envoyer un signal plutôt puissant (provenant, par exemple, un émetteur de 250 kW) de l'autre côté du monde, à une distance d'environ 20.000 kilomètres à vol d'oiseau. Le signal doit faire 5 bonds de 4000 kilomètres chacun, ou 7 bonds de 3000 kilomètres chacun pour atteindre cette région, et une distance aussi importante ne peut pas être couverte dans des conditions défavorables.

Bien sûr toutes les émissions en ondes courtes ne sont pas destinées à une région cible se trouvant à 20.000 kilomètres. Le quart ou la moitié de cette distance est plus habituel, et ce circuit est considéré comme une liaison à 2 ou 3 bonds. Alors, comment pouvons-nous déterminer la fréquence en ondes courtes qui doit être utilisée pour un tel circuit? Il faut prendre en compte les propriétés de réfraction de la couche F_2 aux points de contrôle, car elles déterminent la fréquence maximale que nous pouvons utiliser. Cette fréquence maximale est généralement appelée la fréquence maximale utilisable (abréviation FMU ou MUF *maximum usable frequency*), et est valable pour les signaux rayonnés en direction quasiment parallèle à la surface terrestre. Parfois, elle est définie comme FMU F_2 4000, ce qui indique la couche pour laquelle la FMU est destinée et la distance couverte dans un bond isolé. Il existe aussi la fréquence minimale utilisable (FmU ou LUF *lowest usable frequency*) qui peut s'expliquer en considérant la quantité d'absorption produite quand le signal pénètre plusieurs fois les couches ionosphériques inférieures à celle de la F_2 , et surtout pendant la journée quand elles sont toutes présentes: D, E, et F_1 .

La fréquence qui est finalement choisie pour conduire la transmission à une région précise se trouve entre la FMU (fréquence maximale utilisable) et la FmU (fréquence minimale utilisable) aux points de contrôle. Dans une liaison de 8000 kilomètres, il y en a trois. Dans des cas comme celui-ci, où la liaison en ondes courtes n'est pas trop longue, il suffit de considérer uniquement les conditions aux deux points de contrôle terminaux. On trace donc le circuit sur un globe terrestre, et deux points de contrôle sont trouvés, respectivement à 2000 kilomètres de l'émetteur (le premier point de réflexion) et 2000 kilomètres de la région de réception (le dernier point de réflexion).

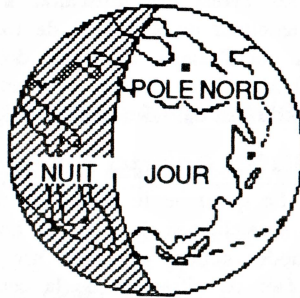
- > Entre quelles limites choisit-on une fréquence de travail pour un circuit donné?
- > Que se passe-t-il quand celle qui est choisie est trop élevée? Et si elle est trop basse?

La rotation de la Terre et son orbite autour du Soleil

Il est important de connaître les mouvements de la Terre par rapport au Soleil car la radiation solaire détermine les possibilités de communications en ondes courtes. Le degré d'ionisation dépend de la position du Soleil par rapport au point de contrôle, et c'est ici qu'entrent en jeu la saison et l'heure. L'activité solaire a sa plus importante influence sur la couche lorsque l'intensité des rayons solaires est maximale.

La moitié de la Terre, grosso modo, est éclairée à un moment déterminé car elle se trouve face au Soleil, tandis que l'autre moitié est dans l'obscurité (Figure 6). Une zone étroite crépusculaire existe entre les deux, causée par la lumière solaire répandue dans l'atmosphère et par la position basse du Soleil sur l'horizon. Comme la Terre fait une révolution complète sur son axe toutes les 24 heures, nous recevons tous notre portion de jour et de nuit.

Figure 6

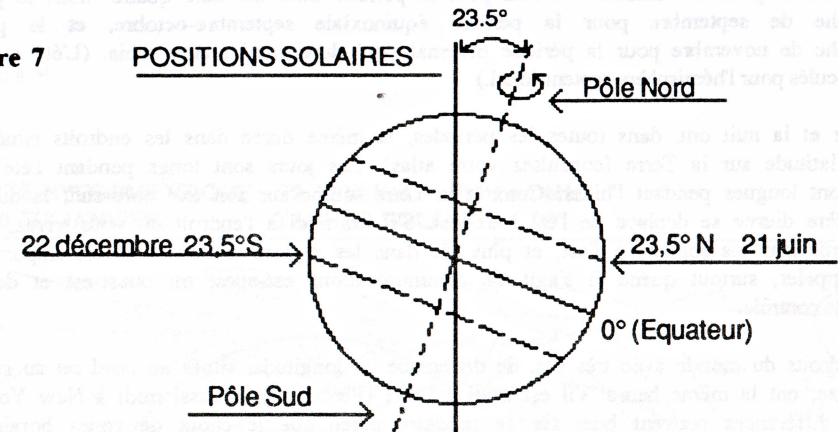


Il existe un second effet qui complique la question: la Terre tourne une fois par an autour du Soleil. L'axe de la Terre (la ligne qui rejoint le pôle Nord au pôle Sud) n'est pas perpendiculaire au plan orbital, mais se trouve à un angle de 66,5 degrés (Figure 7). C'est ainsi qu'à certaines époques, l'hémisphère nord reçoit plus de Soleil (et pour une plus longue durée) que l'hémisphère sud, et vice versa. En d'autres termes, ce phénomène est responsable de nos saisons.

Regardons maintenant les positions relatives de notre planète par rapport au Soleil. Pendant la période du 23 septembre au 21 mars, le Soleil est perpendiculaire au-dessus de la zone tropicale australe qui s'étend de l'équateur jusqu'à 23,5 degrés sud. Il occupe déjà sa position la plus australe le 22 décembre, et dans l'hémisphère sud c'est l'été. Du 21 mars au 21 juin, le Soleil est perpendiculaire au-dessus de l'équateur. Dans l'hémisphère nord c'est le printemps et dans l'hémisphère sud c'est l'automne. Le 21 juin, le Soleil atteint sa position la plus nordique, étant perpendiculaire au-dessus du Tropique du Cancer et c'est l'été dans l'hémisphère nord (Figure 8).

Ces phénomènes ont des répercussions pour la propagation des ondes courtes, car l'état de l'ionosphère dépend de combien de temps elle est soumise à la radiation et à l'intensité de celle-ci, qui à son tour dépend de l'apogée du Soleil sur l'horizon.

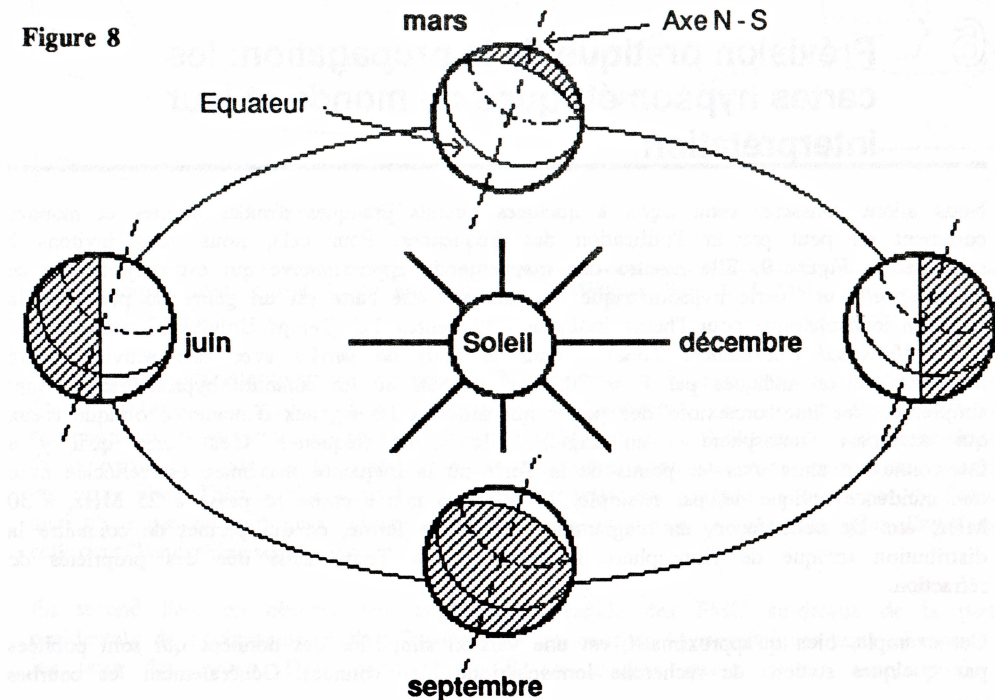
Figure 7



Ces considérations nous amènent à quelques conclusions importantes: les fréquences que nous utilisons pour les communications en ondes courtes doivent être étudiées au moins toutes les saisons et adaptées s'il le faut. La tolérance (déviations dues aux conditions variables) dans le choix de fréquences doit être assez grande pour couvrir toute la saison.

Voici ce qui se passe dans la pratique: les changements dans les horaires et les fréquences des stations d'ondes courtes ont lieu le premier dimanche de mars pour la période équinoxiale

Figure 8



mars-avril, le premier dimanche de mai pour la période d'été qui dure quatre mois, le premier dimanche de septembre pour la période équinoxiale septembre-octobre, et le premier dimanche de novembre pour la période hivernale qui dure aussi quatre mois. (L'été et l'hiver sont calculés pour l'hémisphère septentrional.)

Le jour et la nuit ont, dans toutes les périodes, la même durée dans les endroits situés à la même latitude sur la Terre (consultez votre atlas). Les jours sont longs pendant l'été et les nuits sont longues pendant l'hiver. Comme la Terre tourne sur son axe nord-sud, la durée de la lumière diurne se déplace de l'est à l'ouest. S'il est midi à l'endroit où vous vivez, il sera plus tard dans les régions à l'est, et plus tôt dans les régions à l'ouest. Il est important de s'en rappeler, surtout quand il s'agit de communications est-ouest ou ouest-est et de leurs points de contrôle.

Les endroits du monde avec très peu de différence de longitude, situés au nord ou au sud l'un de l'autre, ont la même heure: s'il est midi à Lima (Pérou), il est aussi midi à New York. De petites différences peuvent bien sûr se produire parce que le choix de zones horaires est artificiel. Toutefois, cette condition n'est pas vraie près de la ligne de changement de date (une ligne imaginaire qui s'étend plus ou moins du nord au sud, située entre l'Alaska et le point oriental extrême de la Sibérie, et qui s'étend vers le sud en passant à l'est de la Nouvelle-Zélande).

» Quelle est l'influence de la rotation de la Terre, et quels sont les phénomènes périodiques provoqués par l'orbite de la Terre autour du Soleil?

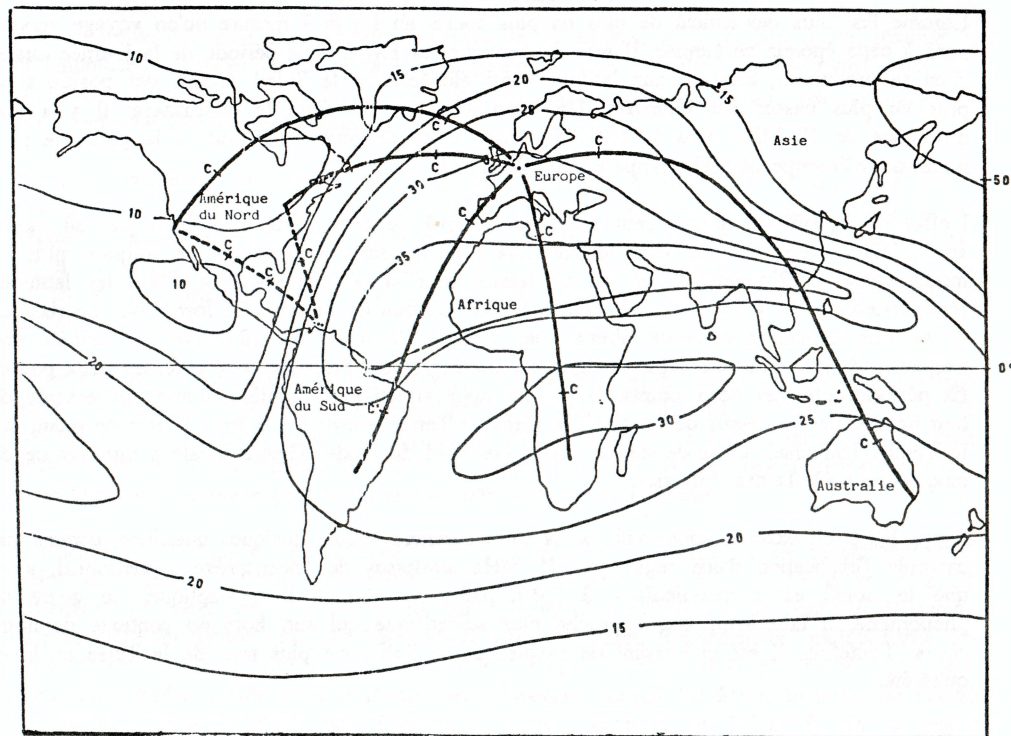
6 Prédiction pratique de la propagation: les cartes hypsométriques du monde et leur interprétation

Nous allons consacrer cette leçon à quelques circuits pratiques d'ondes courtes et montrer comment on peut prévoir l'utilisation des fréquences. Pour cela, nous vous invitons à consulter la Figure 9. Elle montre une mappemonde approximative qui est projetée sur ce qu'on appelle une carte hypsométrique du monde. Cette carte est un genre de photo de la situation ionosphérique pour l'heure indiquée - 12 heures TU (Temps Universel - aussi appelé UTC: *Universal Coordinated Time*) - dans le mois de janvier avec une activité solaire moyenne qui est indiquée par $R = 70$. Les courbes, ou les contours hypsométriques, sont simplement les interconnexions des points qui reflètent les signaux d'incidence oblique (ceux qui atteignent l'ionosphère à un angle) à la même fréquence. C'est ainsi qu'il y a une interconnexion entre tous les points de la Terre où la fréquence maximale est réfléchiée avec une incidence oblique de, par exemple, 20 MHz; la même chose se passe à 25 MHz, à 30 MHz, etc. De cette façon, un diagramme complet se forme, ce qui permet de connaître la distribution ionique de l'ionosphère au-dessus de la Terre, ainsi que ses propriétés de réfraction.

Cet exemple, bien qu'approximatif, est une version simplifiée des données qui sont publiées par quelques stations de recherche ionosphérique bien connues. Généralement les courbes

Figure 9

CARTE HYSOMETRIQUE F2 4000 Km. FMU en MHz
12.00 TU JANVIER. TACHES SOLAIRES = 70



hypsométriques sont tracées à des intervalles de 2 MHz au lieu de 5 MHz, mais pour nous, cet exemple suffira.

Observons-le plus attentivement. En premier lieu, on voit qu'à cette heure de la journée, avec des conditions hivernales dans l'hémisphère septentrional, un minimum évident de conditions existe au-dessus de l'ouest de l'Amérique du Nord, où il fait encore nuit et au-dessus de la partie orientale de la Sibérie, où les conditions nocturnes sont imminentes ou déjà présentes. Dans l'hémisphère austral, les jours sont tellement longs à cette époque de l'année qu'il n'y a pas de minimum évident, et la fréquence minimale est beaucoup plus élevée que celle dans l'hémisphère septentrional.

En second lieu, on observe une augmentation rapide des FMU au-dessus de la partie occidentale de l'Atlantique et des Caraïbes, où les courbes hypsométriques sont très proches les unes des autres. Dans cette région il est environ quatre heures avant midi, et

8h00 heure d'hiver marque la pointe de jour dans les latitudes boréales, et tôt le matin dans les tropiques. (Au fait, une carte horaire du monde serait utile pour vos prévisions.)

Le même effet, mais dans l'ordre inverse, peut être observé au-dessus du littoral de la Chine, où une chute relativement rapide des FMU se produit. 12 heures TU sera environ 19 ou 20 heures (heure locale) dans la partie du littoral chinois en question. Aussi peut-on observer cette baisse rapide des FMU après le coucher local du Soleil.

Comme les jours deviennent de plus en plus courts au fur et à mesure qu'on voyage vers le nord à cette époque de l'année, il sera évident que les FMU, et la période de la journée quand elles se produisent, baissent aux latitudes plus élevées, car le Soleil occupe des positions de plus en plus basses sur l'horizon. Un coup d'œil sur la carte le confirmera: il y a une différence de 10 MHz dans la FMU F₂ 4000 entre l'Europe de l'ouest et la partie la plus nordique de l'Europe: 30 MHz comparé à 20 MHz à midi TU.

L'effet de la période diurne peut aussi être dérivé de cette carte hypsométrique, au moins approximativement. Comme vous le savez, la période diurne à l'équateur est toujours plus ou moins égale à 12 heures; il en est de même pour la période nocturne. Dans les latitudes septentrionales, les jours sont plus courts à cette époque de l'année. La forme des courbes en donne une indication évidente. Prenez par exemple la ligne des 20 MHz qui indique une fréquence diurne. Elle intercepte la ligne des 50 degrés du Tropique de Cancer en deux points. La période entre ces deux points, la période approximative de lumière diurne, est environ de huit heures, car au-dessus de l'Atlantique (près de Terre-Neuve) il y a trois heures de retard sur le Temps Universel, et au-dessus de l'Asie (au nord de l'Inde) l'heure locale a une avance de cinq heures sur le Temps Universel.

Notez Bien: un examen approfondi de la carte suscitera encore quelques questions, comme par exemple l'explication d'une région de 35 MHz au-dessus de l'hémisphère septentrional, alors que le Soleil est perpendiculaire à l'hémisphère méridional. Pour expliquer ce genre de phénomène, il faut avoir une approche plus scientifique qui sort hors du contexte de notre cours. Toutefois, il est intéressant de savoir que le Soleil est plus près de la Terre en hiver qu'en été.

› Qu'est-ce qui serait plus utile du point de vue de la propagation: un émetteur d'ondes courtes dans les tropiques ou un au pôle Sud? Expliquez brièvement.

7

Prévision pratique de la propagation:

2 - résultats

Dans la leçon précédente, nous avons examiné une version simplifiée d'une carte hypsométrique du monde qui nous a donné quelques indications sur les conditions ionosphériques à un moment précis. Pour d'autres heures, on dispose d'autres cartes qui dans leur ensemble couvrent une période complète de 24 heures. Donc si l'on désire réaliser une communication d'ondes courtes à une autre heure, on doit consulter une carte différente, et si l'émission dure plus d'une heure, on doit comparer plusieurs cartes, car l'émission est généralement sur les mêmes fréquences.

On peut imaginer, par contre, comment la carte sera à 1400 TU. Il n'y aura pas de changements importants dans les courbes elles-mêmes, mais le diagramme entier se sera déplacé vers l'ouest - à cause de la rotation de la Terre - améliorant ainsi les conditions pour la région Atlantique grâce à l'augmentation des FMU. D'autre part, une grande partie de l'Asie se trouvera maintenant dans l'obscurité, et les conditions correspondront aux FMU plus basses.

Regardons maintenant quelques circuits réels à 1200 TU. Vous verrez sur la carte des lignes noires et épaisses dessinées entre l'Europe et l'Australie, l'Afrique, et les Amériques. Ces courbes suivent ce qu'on appelle la liaison de cercle maximal (la ligne d'union la plus courte possible) au-dessus du monde. La courbure est due à la méthode de projection choisie pour la carte du monde, comme on peut facilement vérifier avec une boule terrestre.

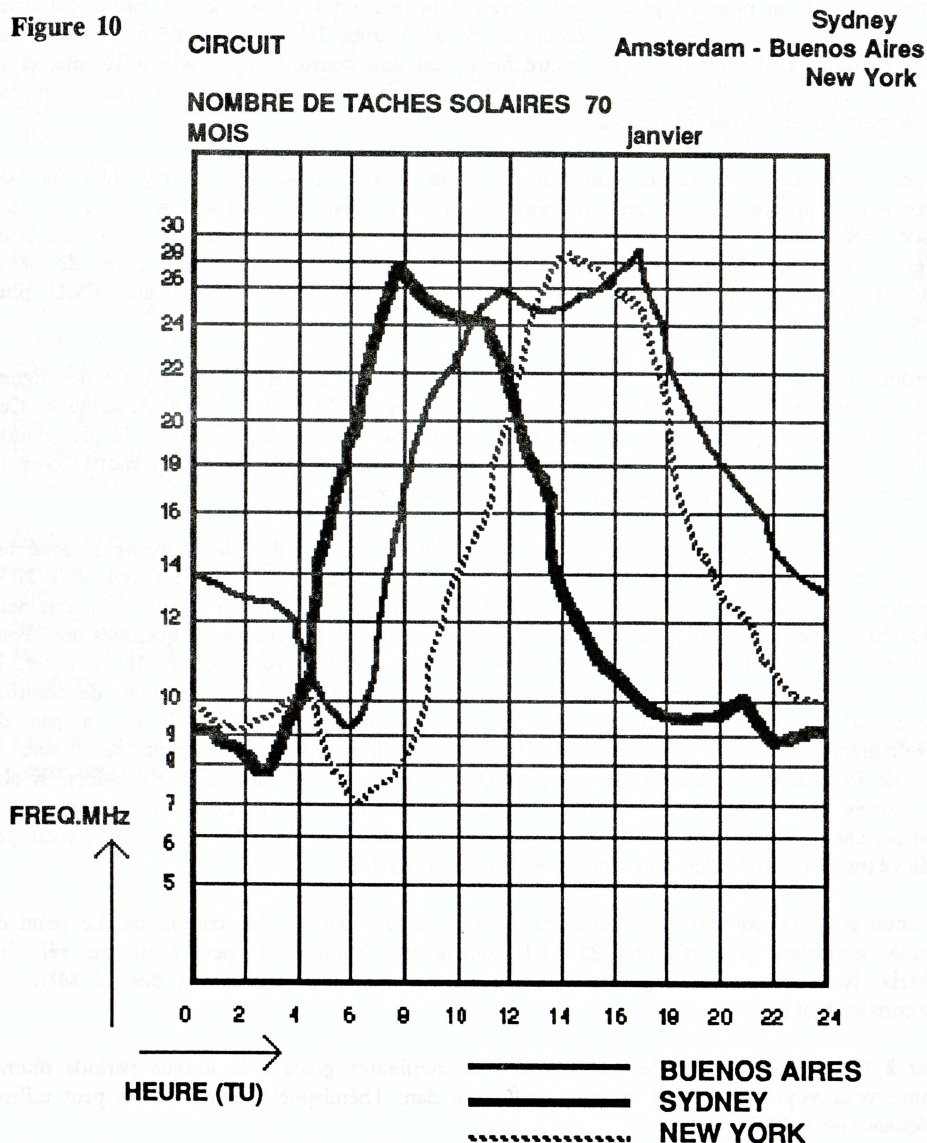
Sur les lignes du circuit (les courbes que nous venons de décrire), nous avons indiqué les points de contrôle (indiqués par la lettre C), situés à 2000 kilomètres de l'émetteur et à 2000 kilomètres du récepteur. Les conditions ionosphériques à ces points de contrôle déterminent la plus haute fréquence qui peut être utilisée dans le circuit. Regardons-en quelques-uns. Pour commencer, un circuit simple: de l'Europe à l'Afrique. Comme vous pouvez le constater, le point de contrôle austral peut réfléchir des fréquences jusqu'à 30 MHz, le point de contrôle septentrional peut réfléchir des fréquences jusqu'à environ 34 MHz. Il n'y a pas de dénivelllements importants entre ces FMU, alors nous pouvons dire que pour ce circuit, la bande de fréquences la plus élevée qui peut être utilisée est celle des 25 MHz. Alors, si elle était utilisée à cette heure (midi), vous auriez une meilleure possibilité de la syntoniser sur 21 MHz, car le nombre de récepteurs équipés de la bande des 25 MHz (11 mètres) n'est pas très élevé (mais il s'agit là d'une question complètement différente).

Le circuit entre l'Europe et l'Amérique du Nord ou vice versa est plus compliqué. Le point de contrôle "européen" peut réfléchir 25 MHz, tandis que "l'américain" peut seulement réfléchir 15 MHz. Nous devons donc choisir notre fréquence de travail en-dessous des 15 MHz. 12 MHz conviendrait bien.

Quant à l'Amérique du Sud, les conditions sont meilleures grâce à la longue période diurne. Comme vous voyez, le circuit complet se trouve dans l'hémisphère diurne et on peut utiliser la fréquence de 25 MHz.

Le circuit Europe-Australie ou Australie-Europe est le plus long de cette série. Un coup d'œil sur les points de contrôle indique que les deux peuvent réfléchir assez bien les 21 MHz (13 mètres), mais si nous examinons ce (long) circuit plus attentivement, nous constatons que quelque part au-dessus de l'Asie, la liaison touche la ligne hypsométrique de 20 MHz. Nous avons ici un exemple où les conditions aux points de contrôle terminaux ne sont pas suffisantes pour déterminer la fréquence de travail. Nous devons considérer les autres points de réflexion du circuit, et nous devons savoir que les propriétés de réfraction du point avec la plus basse FMU déterminent la fréquence que nous pouvons utiliser pour ce circuit.

Figure 10



Venons maintenant à la Figure 10. Elle montre les propriétés du circuit complet sur une période de 24 heures pour les trois liaisons que nous venons de citer. La fréquence est indiquée sur l'axe vertical, l'heure sur l'axe horizontal. Bien que les résultats publiés ici soient tirés de prévisions journalières, les différences avec notre carte hypsométrique simple à midi sont très minimes. Regardez l'intersection de la carte australienne avec la ligne de 1200 TU et vous verrez que la fréquence de 22 MHz est la plus élevée à être utilisée. Mais une heure plus tard (à 1300 TU), la FMU est déjà tombée à 18 MHz; cela est dû aux changements des conditions au-dessus de l'Asie.

Pour New York (côte est de l'Amérique du Nord), nous constatons une brusque augmentation de la FMU entre 1000 et 1200 TU, et une "apogée" assez prononcée, avec un maximum à 1400 TU, qui tombe rapidement après 1700 TU à cause de la courte période diurne.

Ces graphiques peuvent être composés à l'aide de cartes hypsométriques qui indiquent les FMU. La FMU est définie comme la fréquence qui assure une communication adéquate 50% du temps. Généralement les stations d'ondes courtes désirent avoir une marge de sécurité plus importante pour la réception, et elles choisissent donc une fréquence de travail bien en-dessous de la FMU (c'est-à-dire 85% de la FMU, appelée "la fréquence optimale de travail" ou FOT). Si la FMU est 22 MHz, la première bande "sûre" pour la radiodiffusion en ondes courtes est celle en-dessous de $\frac{85}{100} \times 22$ MHz. Il s'agit donc de la bande des 17 MHz.

➤ Voir la Figure 9. Indiquez vos prévisions pour les circuits: Bonaire-San Francisco et Bonaire-New York comme le montrent les lignes pointillées à midi TU en janvier (R=70), donc en accord avec le schéma de distribution dans la figure. Donnez aussi vos prévisions pour 1400 TU.

8 Vos propres prévisions

Dans les leçons précédentes, nous avons parlé de plusieurs circuits de transmission à l'aide d'une carte hypsométrique. Cette carte a été utile pour donner un petit aperçu, mais pour faire la détermination pratique du circuit, nous aurions besoin de nouvelles données chaque mois et cela serait très onéreux. Cependant, pour réaliser vos propres prévisions, il suffit d'utiliser les connaissances acquises dans les leçons antérieures, de préférence avec une carte horaire du monde et un globe.

Pour trouver la bande qui sera probablement utilisée par une station, nous devons considérer ce qui suit:

1. Sur le globe, nous devons repérer la position géographique de l'émetteur et celle du récepteur et les relier avec un morceau de ruban ou de ficelle. Nous déterminons les points de contrôle situés sur le circuit, à 2000 kilomètres aussi bien de l'émetteur que du récepteur. Les propriétés de réfraction de ces points (si la liaison n'est pas trop longue) détermineront maintenant la FMU.

2. Pour trouver la fréquence maximale qui sera encore réfléchi aux points de contrôle avec une incidence oblique, nous devons déterminer s'il fait jour ou nuit pendant la durée de l'émission. Nous avons en principe 3 possibilités:
 - a) tout le circuit est dans l'hémisphère diurne. Dans ce cas, la fréquence prévue sera plutôt élevée, car l'ionosphère est soumise à la radiation directe du Soleil.
 - b) tout le circuit (du point de contrôle au point de contrôle) est dans l'obscurité. Dans ce cas, la fréquence prévue sera plus basse.
 - c) un point de contrôle est dans l'hémisphère diurne, tandis que l'autre est dans le nocturne.
3. La saison joue un rôle important car elle détermine la durée du jour et celle de la nuit. Comme nous avons pu le constater, l'influence de la saison sur la durée de la période diurne augmente avec les latitudes plus élevées.
4. L'activité solaire. La meilleure méthode est de commencer avec une activité solaire moyenne ($R=70$), et d'ajouter 2,5 MHz à la fin du calcul quand l'activité solaire est élevée (1987-1992), et d'enlever 2,5 MHz quand l'activité solaire est faible (1998-2001).

Examinons maintenant quelques exemples pratiques. D'abord le circuit Sydney-Wellington (Australie-Nouvelle-Zélande). Il y a un point de contrôle situé au-dessus de l'Océan Pacifique précisément entre les deux.

Heure choisie: 1200 TU, janvier: à cette heure de la journée, il est environ 23h00 heure locale au point de contrôle, c'est-à-dire des conditions nocturnes. Janvier correspond à l'été dans l'hémisphère austral. Les jours sont longs, les nuits sont courtes, donc le niveau d'ionisation de la couche F_2 est encore assez élevé, davantage parce qu'il ne fait nuit que depuis quelques heures. Prenant en compte tous ces facteurs, nous pouvons prévoir avec certitude une FMU F_2 4000 kilomètres d'un peu plus de 20 MHz. Comme la longueur du circuit est environ 3000 kilomètres, ce qui signifie que l'angle d'incidence doit être un peu plus grand que pour un bond de 4000 kilomètres, on peut prévoir avec certitude l'utilisation de 17 MHz à cette heure. Il est évident qu'on ne peut pas utiliser cette fréquence pendant toute la nuit car la couche F_2 a tendance à se détériorer lentement. A 3 heures du matin, 15 ou 11 MHz sera adéquat pour l'activité solaire moyenne à cette latitude basse (37° S), mais pendant l'hiver et pendant des périodes solaires moins intenses, la FMU tombera bien en-dessous des 11 MHz.

Notre deuxième exemple se rapporte à un circuit Nord-Sud qui passe par l'équateur: New York (41° N) à Buenos Aires (35° S). On suppose une activité solaire peu intense. Les communications ont lieu à 0200 TU au mois de juin. Premièrement, il faut déterminer les points de contrôle. L'heure du jour pour les points de contrôle est environ 21h00 et c'est l'été dans l'hémisphère septentrional. On peut s'attendre à ce que la FMU soit déterminée par le point de contrôle austral, qui sera le moins élevé, mais à cause de la basse latitude du point de contrôle austral, qui se trouve à environ 16° Sud au-dessus du Brésil, où il fait nuit depuis quatre heures, on devrait s'attendre à ce que 20 MHz puisse être utilisé. A cause de la faible activité solaire, nous retranchons 2,5 MHz, ce qui donne 17,5 MHz. Après avoir pris la marge de sécurité en compte, nous prévoyons 15 MHz comme maximum, ou 11 MHz pour ce circuit.

Pour vous donner une idée de la dégradation ultérieure de la FMU sur ce circuit: à 0400 TU, elle est de 14 MHz, et à 0600 TU elle tombe à 12 MHz, c'est-à-dire une fréquence maximale de travail de 9 MHz.

Un dernier exemple: Maroc (34° N, 7° O) à Singapour (2° N, 104° E). L'heure est choisie pour qu'il y ait un passage jour-nuit entre les points de contrôle.

Heure: 1800 TU

Saison: Equinoxe (mars/avril ou septembre/octobre)

Nombre de taches solaires: 70 (valeur moyenne)

Point de contrôle boréal: environ 35 MHz

Point de contrôle austral: environ 26 MHz

La bande optimale utilisable: 21 MHz

► Faites la prévision pour le circuit Maroc-Singapour à 1800 TU en décembre. L'activité solaire est faible ($R=5$).

9

Pertes de signal entre l'émetteur et le récepteur

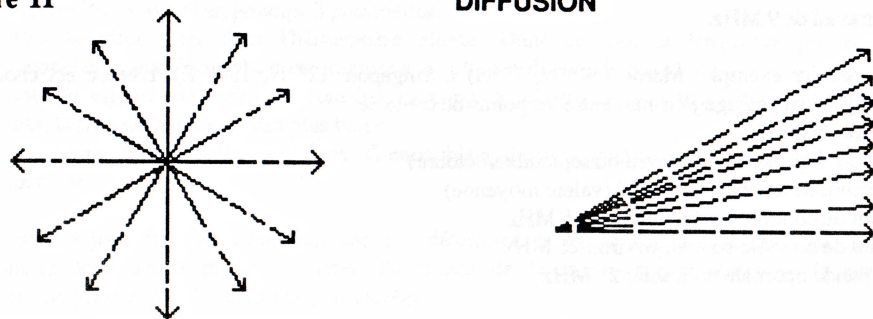
Jusqu'à présent, nous avons concentré nos efforts à déterminer la fréquence la plus élevée possible pour un circuit: la FMU (fréquence maximale utilisable) qui offre une communication sûre 50% du temps, et la FOT (fréquence optimale de travail) qu'on prétend sûre 90% ou 85% du temps.

Alors, pourquoi en ondes courtes devrait-on s'efforcer d'utiliser les fréquences élevées? L'observateur insouciant pourrait dire que n'importe quelle fréquence en-dessous de la FMU sera suffisante et aura peut-être le double avantage d'offrir une communication sûre pendant toutes les saisons et pendant les différents cycles de l'activité du Soleil. Mais cela serait trop optimiste. Le choix des fréquences n'est pas seulement limité sur le côté supérieur du spectre des ondes courtes, mais aussi sur le côté inférieur. Il n'existe pas seulement une FMU, mais aussi une FmU (fréquence minimale utilisable) qui est caractéristique pour chaque circuit et chaque saison. Examinons ce sujet en détail.

A part les pertes de signal qui ont lieu entre l'émetteur et le récepteur à cause des fautes d'adaptation, des pertes d'antenne, etc., une grande quantité d'énergie est perdue dans l'espace pendant le trajet du signal entre l'émetteur et le récepteur. Le signal total qui parvient à l'antenne du récepteur, après s'être réfléchi contre l'ionosphère, est composé de signaux individuels qui ont suivi des liaisons différentes. Pendant son voyage, le signal a été soumis à différents genres de pertes de circuit. Premièrement, il existe ce qu'on appelle la dispersion en proportion inverse au carré de la distance, due simplement à la dispersion de l'énergie depuis un point (l'antenne d'émission). Pour limiter la dispersion inutile, la plupart des stations d'ondes courtes utilisent des antennes de faisceau qui ont l'avantage de diriger l'énergie dans un angle horizontal plutôt petit (20 à 30 degrés), suffisant pour couvrir la région cible. L'utilisation d'une antenne directionnelle donne un gain de signal dans la direction choisie, mais n'affecte pas l'effet de diffusion: la même quantité d'énergie "remplit"

tout simplement une région plus grande au fur et à mesure qu'elle s'éloigne de l'émetteur (voir la Figure 11).

Figure 11



DIFFUSION

ANTENNE OMNIDIRECTIONNELLE

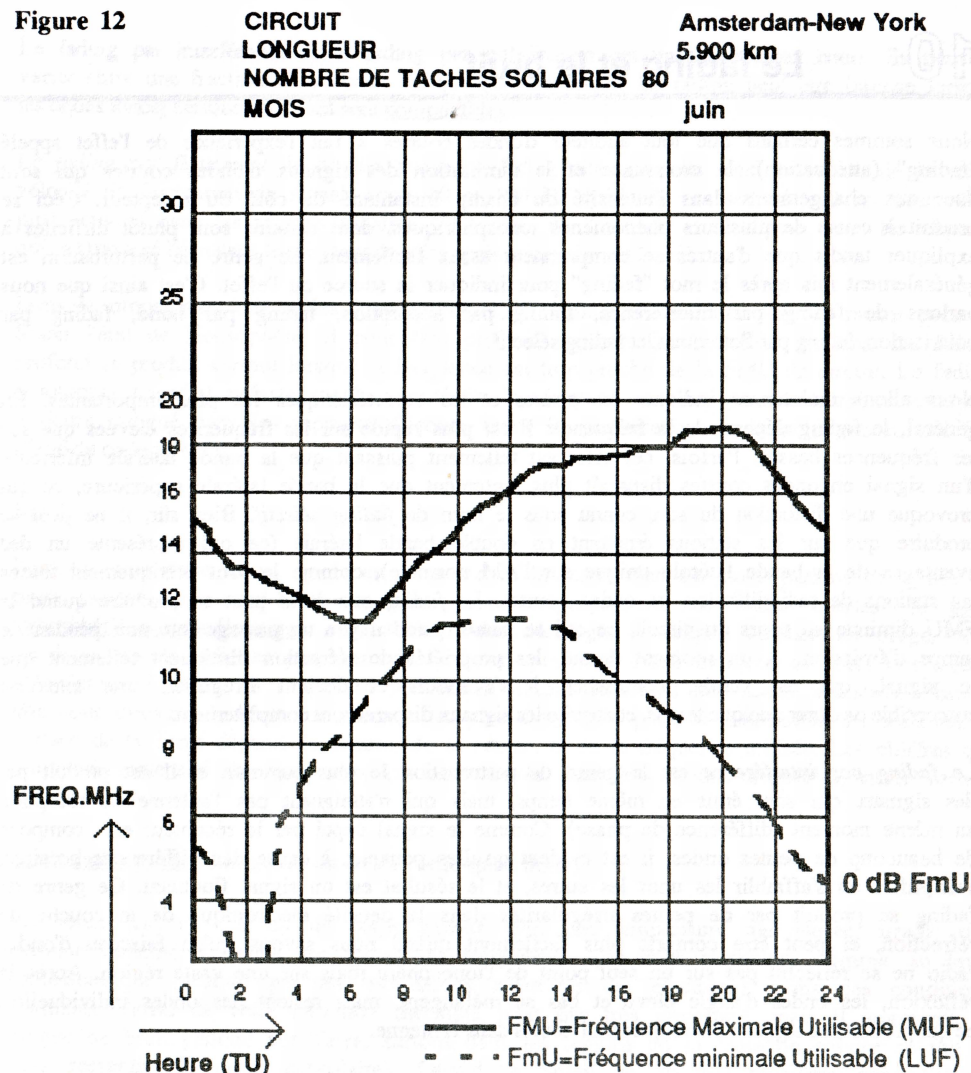
ANTENNE DIRECTIONNELLE

La deuxième source importante de perte de signal c'est l'absorption dans l'ionosphère. Cette absorption a lieu surtout dans la région D et la couche E à des altitudes entre 50 et 110 kilomètres, la quantité étant proportionnelle à la longueur du chemin à travers les couches: plus le circuit est long, plus l'absorption sera grande. Ceci signifie que l'absorption augmente en fonction du nombre de bonds et elle augmente aussi avec la distance entre l'émetteur et le récepteur. Dans les latitudes moyennes (40° à 70°), on peut ajouter que la quantité d'absorption par bond dépend de facteurs comme le nombre de taches solaires, l'angle d'élévation du faisceau (qui dépend des caractéristiques de l'antenne d'émission), la fréquence, et l'heure. Pour être plus précis: l'absorption augmente avec le niveau d'ionisation des couches en-dessous de la couche de réfraction (F) ainsi qu'avec l'activité solaire croissante. En règle générale, il y a beaucoup plus d'absorption pendant la journée que pendant la nuit; les fréquences basses y sont plus susceptibles que les fréquences élevées; et plus le bond est long, plus l'absorption sera importante à cause de la longueur du circuit dans la région d'absorption. Dans les régions tropicales, l'influence de l'absorption a tendance à être plus importante que dans les latitudes supérieures. Dans cette région, l'absorption est aussi influencée par la variabilité du profil de la couche F et d'autres facteurs.

Une troisième cause de perte de signal c'est qu'il y a toujours dispersion du signal lorsqu'il se produit une pénétration des couches ionosphériques. La quantité de dispersion dépend du niveau d'ionisation des couches pénétrées, et sera inversement proportionnelle à la fréquence utilisée (plus la fréquence est élevée, moins il y aura de dispersion). La dispersion a lieu aussi pendant les réflexions terrestres de l'onde ionosphérique. Les montagnes Himalaya sont une région bien connue de dispersion.

Ces facteurs déterminent ce qu'on appelle la FmU pour un circuit. Il est possible de donner une représentation graphique de la FmU (fréquence minimale utilisable) dans le diagramme de la FMU (Figure 12) pour une liaison donnée, et aussi certaines dispositions se rapportant à la puissance effective de radiation (PES ou ERP *effective radiated power*) de l'antenne d'émission. Toutefois, le fait que l'absorption diminue quand la fréquence augmente est important pour les stations de moyenne et de faible puissance, car plus la fréquence est élevée, plus le signal sera fort dans la région cible avec la même PES.

Figure 12



Quand les conditions sont défavorables, la FmU peut être aussi élevée ou elle peut même dépasser la FMU. Dans de telles conditions, toute communication en ondes courtes devient impossible. Ces conditions peuvent se présenter sur certaines liaisons longues, quand les passages jour-nuit baissent la FMU, alors que les longues périodes que passe le circuit dans l'hémisphère diurne augmentent la FmU.

> Quels sont les facteurs qui déterminent la FmU (fréquence minimale utilisable)? Quelle situation se produit lorsque la FmU dépasse la FMU?

Nous sommes certains que tout auditeur d'ondes courtes a fait l'expérience de l'effet appelé "fading" (atténuation): la croissance et la diminution des signaux d'ondes courtes qui sont dues aux changements dans l'intensité du champ instantané du côté du récepteur. Ceci se produit à cause de plusieurs phénomènes ionosphériques, dont certains sont plutôt difficiles à expliquer tandis que d'autres se comprennent assez facilement. Le genre de perturbation est généralement mis après le mot "fading" pour indiquer la source ou l'effet. C'est ainsi que nous parlons de fading par interférence, fading par absorption, fading par bond, fading par polarisation, fading par flottement, et fading sélectif.

Nous allons maintenant indiquer les causes et les caractéristiques les plus importantes. En général, le fading dépend de la fréquence: il est plus rapide sur les fréquences élevées que sur les fréquences basses. Parfois, cet effet est tellement puissant que la bande latérale inférieure d'un signal en ondes courtes disparaît plus lentement que la bande latérale supérieure, ce qui provoque une distorsion du son, connu sous le nom de *fading sélectif*. Bien sûr, il ne peut se produire que sur les stations émettant en double bande latérale (ce qui représente un des avantages de la bande latérale unique sur l'AM normale), comme le sont pratiquement toutes les stations de radiodiffusion en ondes courtes. Le *fading par bond* peut se produire quand la FMU diminue au cours du circuit, ce qui se passe quand il y a un passage jour-nuit pendant le temps d'émission. A un moment donné, les propriétés de réfraction diminuent tellement que le signal, qui est stable, commence à s'évanouir et devient irrégulier, une situation susceptible de durer quelque temps, et ensuite les signaux disparaîtront complètement.

Le *fading par interférence* est le genre de perturbation le plus commun et il est produit par des signaux qui sont émis en même temps, mais qui n'atteignent pas l'antenne de réception au même moment (différence de phase). Comme le signal capté par le récepteur est composé de beaucoup de petites ondes, il est évident qu'elles peuvent, à cause des différences horaires, s'amplifier ou s'affaiblir les unes les autres, et le résultat est un signal fluctuant. Ce genre de fading se produit par de petites irrégularités dans la densité électronique de la couche de réfraction, et peut être compris plus facilement quand nous savons qu'un faisceau d'ondes radio ne se réfléchit pas sur un seul point de l'ionosphère mais sur une vaste région. Après la réflexion, les ondes d'angle élevé et bas se mélangent, mais restent des ondes individuelles, ce qui produit des signaux électriques individuels dans l'antenne.

Le *fading par polarisation* est un peu plus difficile à comprendre. La direction de la polarisation de l'onde radiophonique est définie comme la direction dans laquelle se dirige le vecteur électrique des points du rayon électromagnétique. La polarisation horizontale est utilisée fréquemment en ondes courtes. Les antennes d'émission utilisent des radiateurs horizontaux. Au point de réception, la situation peut être complètement différente. Les ondes individuelles peuvent avoir des directions de polarisation différentes, surtout après avoir voyagé sur de longues distances. Une polarisation aléatoire peut encore offrir un signal stable, mais une polarisation variable (causée par exemple par une ionosphère turbulente) produit des variations dans la tension induite dans les antennes qui sont ressenties comme du "fading".

Le fading par interférence et le fading par polarisation ont un cycle assez court: ils peuvent varier entre une fraction de seconde ou quelques secondes. Le fading peut être intense lorsque les ondes ionosphériques et de sol sont comparables.

Le *fading par flottement*, le dernier genre de fading cité, s'appelle ainsi en raison de la haute vélocité de fluctuation du signal: entre 10 et 100 Hz (périodes par seconde). Il est observé le plus souvent dans les régions polaires (les zones de l'aurore), et il affecte aussi les signaux qui ont traversé l'équateur le soir, tout de suite après le coucher du Soleil.

Dans la propagation des ondes ionosphériques, le fading est toujours plus ou moins présent. Selon l'état de l'ionosphère, il peut être profond ou superficiel, rapide ou lent. Le fading profond se produit surtout lorsque la fréquence est trop proche de la FMU du circuit. Le fading a toujours un effet néfaste sur la qualité de la réception et c'est pour cette raison qu'il est toujours indiqué dans les rapports d'écoute (sous P: perturbation de la propagation, qui fait partie du code SINPO).

Bruit

Pour terminer cette leçon, quelques mots sur le bruit, et bien sûr nous parlons du genre de bruit radiophonique qui est important pour la propagation en ondes courtes: le bruit atmosphérique radioélectrique, surtout dû à des décharges électriques pendant un orage, dont les émissions de radio se propagent de la façon que nous avons indiquée au cours des leçons précédentes. Comme les orages se produisent surtout au-dessus des zones terrestres, c'est là que nous trouvons le bruit aux niveaux les plus élevés. De plus, la distribution du bruit sur la surface de la Terre dépend de l'heure, de la saison, et de la fréquence utilisée. Les chiffres qui indiquent l'intensité du bruit sont les plus élevés dans les régions tropicales, mais varient avec la saison.

Bruit radio-solaire (un genre de bruit radio-galactique)

Le Soleil (calme), qui est un corps gazeux avec une température très élevée, irradie une certaine quantité d'énergie sur toutes les fréquences, que nous ressentons comme du bruit radioélectrique (produit par les oscillations aléatoires des électrons). Dans des conditions normales, l'effet de cette radiation thermique n'est pas très important, mais il augmente le niveau de bruit général sur Terre, surtout dans les régions où la radiation solaire se fait le plus ressentir (le point subsolaire). Quand le Soleil se couche, plusieurs constellations s'ajoutent au niveau du bruit, surtout sur les fréquences supérieures à 10 MHz. Ce bruit radio-galactique et le bruit atmosphérique radioélectrique déterminent le niveau de bruit dans les endroits bien éloignés des régions urbanisées.

NOTE: Des bruits qui n'entrent pas dans le cadre de ce cours sont les bruits industriels (la circulation, les appareils électroménagers) et les bruits produits par l'équipement même de réception (mouvements d'électrons).

► Citez quelques genres de fading. Quel genre est le plus fréquent?

Eruptions solaires et leurs effets associés sur la propagation des ondes courtes

Quelques phénomènes associés aux taches solaires ont une influence perturbatrice sur la propagation à ondes décimétriques (HF - hautes fréquences). Un des plus importants est l'éruption solaire, une "explosion" qui peut être observée parfois sur le Soleil près d'une tache solaire. On croit que les éruptions solaires sont produites par des réajustements soudains du champ magnétique dans une tache solaire. L'énergie ainsi engendrée produit de la chaleur qui peut être observée comme un éclaircissement des détails de la chromosphère. L'éruption solaire est associée aux émissions de bruit radioélectrique dans la gamme des fréquences en-dessous des 300 MHz, et aussi aux émissions ultraviolettes, de micro-ondes, et de rayons X, ainsi qu'aux rayons cosmiques. Le réajustement soudain du champ magnétique provoque un nuage de matières (particules).

Les effets terrestres peuvent être très néfastes pour la réception en ondes courtes. Comme la radiation ultraviolette ainsi que la X voyagent à la vitesse de la lumière, tout comme les ondes de radio émises, l'effet direct (simultané) est une augmentation de l'ionisation de la couche E et de la région D. Cela produit une absorption importante des signaux de HF qui traversent la couche E et la région D, et parfois aussi un accroissement de l'ionisation de la couche F. Les particules de radiation cosmique sont retardées quelque peu et tombent en suivant les lignes de force du champ magnétique terrestre, ce qui cause des perturbations ionosphériques sérieuses dans les régions polaires. Le retard varie entre 15 minutes et plusieurs heures. Les particules lentes, surtout les protons et les électrons, qui parviennent à la Terre entre 20 et 35 heures après le début de l'éruption, produisent des orages magnétiques et ionosphériques: ce sont les plus importants de tous les effets produits par les éruptions solaires sur la propagation à ondes décimétriques. Pour résumer, les deux conséquences principales d'une éruption solaire sur la propagation des ondes courtes, hors des zones aurorales (polaires), sont:

- des perturbations ionosphériques soudaines (l'effet direct), et
- des orages ionosphériques (l'effet retardé)

D'abord quelques mots sur les perturbations ionosphériques soudaines. Parfois les signaux d'ondes courtes qui passent par la lumière diurne sont bloqués brusquement par une absorption anormalement élevée de la couche D. Ceci peut durer quelques minutes voire plusieurs heures et est provoqué par une augmentation importante de l'ionisation de la couche D. Le début d'une perturbation ionosphérique soudaine (PIS) est souvent très subit (comme son nom l'indique) et disparaît graduellement au fur et à mesure que la situation ionosphérique redevient normale. Le degré anormalement élevé d'ionisation de la couche D se doit aux rayons X mous. Si la PIS est associée à l'activité solaire, il est évident qu'une activité solaire intense augmente la possibilité de son apparition.

L'orage ionosphérique, qui peut sévèrement bloquer les communications en ondes courtes pendant plusieurs heures voire plusieurs jours, a un lien étroit avec l'orage magnétique. Les orages magnétiques sont des perturbations du champ magnétique terrestre, et peuvent être détectés parce que ses composants varient entre des limites beaucoup plus larges qu'habituellement. Des orages magnétiques importants sont accompagnés d'un ou de plusieurs

phénomènes ionosphériques, tels: la dépression des propriétés de réfraction de la couche F₂, l'absorption accrue de la couche D, et parfois l'apparition de la couche E sporadique (E_s).

La disparition de la FMU, produite par une réduction des propriétés de réfraction de la couche F₂, est responsable de la perte du signal, ainsi que de l'absorption accrue de la couche D. L'orage ionosphérique et l'orage magnétique (et les aurores boréales) sont le résultat des particules qui arrivent entre 20 et 35 heures après l'éruption solaire.

Pour terminer, quelques mots au sujet de l'effet de la radiation cosmique émise pendant une éruption solaire. Attirées par le champ magnétique terrestre, ces particules voyagent selon ses lignes de force et de cette façon elles ont leur plus grande répercussion sur les zones aurorales, lorsque ces lignes de force sont perpendiculaires à la surface terrestre. Des signaux qui passent par les zones, qui sont centrées plus ou moins sur les pôles magnétiques et qui peuvent s'étendre jusqu'à 60 degrés nord ou sud, sont très affaiblis ou complètement absorbés. C'est ce qu'on appelle l'absorption de la calotte polaire (ACP). Comme la propagation dans les régions polaires est sujette à beaucoup de complications et est évitée autant que possible par les stations d'ondes courtes, elle n'est pas d'une importance suffisante pour en parler longuement. Cependant, les ACP ont une importance particulière pour les auditeurs dans le continent nord-américain (consultez quelques circuits à l'aide de votre globe).

- > Citez quelques causes des perturbations de la propagation en ondes courtes ayant un rapport avec les éruptions solaires.

12 Les ondes courtes sur de courtes distances

Il y a une différence importante entre la couverture à longue et à courte distance. Comme on l'a déjà indiqué, les antennes avec un grand angle (vertical) d'élévation sont nécessaires pour atteindre des régions proches. Généralement ces antennes d'émission sont assez simples et émettent la plupart de la radiation vers le ciel. La radiation atteint l'ionosphère à un angle d'incidence vertical ou plutôt petit. Des fréquences assez basses doivent être choisies pour empêcher que les rayons pénètrent l'ionosphère, par exemple entre 3 et 9 MHz. Pendant la nuit, la FMU peut descendre jusqu'à 5 voire 4 MHz, ce qui limite énormément les bandes qui peuvent être utilisées, et peut même rendre impossible la couverture en ondes courtes des régions à moins de 500 kilomètres dans les régions tempérées, où les bandes tropicales (2,3 MHz; 3,4 MHz; et 5 MHz) ne sont pas disponibles et où la bande d'ondes courtes la plus basse est celle des 6 MHz (49 mètres).

Par contre, la couverture à courte distance présente aussi des avantages. Comme il s'agit d'une portée tellement courte (jusqu'à 1500 kilomètres), il n'y a qu'un bond. Les pertes ionosphériques sont donc limitées et les réfractions terrestres ne doivent pas être prises en considération. Ceci signifie que les signaux à un bond sont généralement supérieurs à ceux issus d'une longue distance, en dépit du fait que les puissances des émetteurs sont faibles et que les caractéristiques des antennes sont inférieures à celles des antennes à longue distance (c'est-à-dire un gain beaucoup plus petit).

Les fréquences basses en ondes courtes ont aussi une couverture d'onde de sol. En règle générale, quand elle est exprimée en kilomètres, elle est plus ou moins équivalente à sa longueur d'onde en mètres. Pour les longueurs d'ondes plutôt longues, comme 49 mètres, une portée de sol de plus de 50 kilomètres peut créer une interférence avec l'onde ionosphérique après qu'elle a été réfléchi dans l'ionosphère. Lorsqu'il y a une interférence entre l'onde de sol et l'onde ionosphérique, une zone de fading s'ensuit. Cette zone de fading peut changer pendant une période de 24 heures à cause des variations dans la propagation de l'onde ionosphérique, car la couverture de l'onde de sol est considérée comme étant plutôt stable.

Pour la couverture locale en ondes courtes (un village ou une ville), cela peut nuire de mélanger l'onde de sol et l'onde ionosphérique, car l'onde de sol a une couverture suffisante. Dans ce cas, une antenne d'émission est choisie qui a peu ou qui n'a pas de radiation verticale. Des exemples: la tour ou le mât vertical en demi onde ou en quart d'onde. Ce genre d'antenne irradie surtout de façon circulaire parallèle au sol. L'onde ionosphérique qui quitte la Terre va verticalement à un petit angle horizontal et n'affecte pas les ondes à longue distance car elle est absorbée (basse fréquence, faible puissance) avant de retomber sur Terre. Une tour verticale favorise l'onde de sol, mais sa portée est limitée par l'absorption du sol qui est importante en ondes courtes, et qui augmente au fur et à mesure que la fréquence s'accroît.

Pour terminer, quelques mots sur les bandes tropicales. Les bandes tropicales en ondes courtes se trouvent en bas du spectre des ondes courtes et offrent la possibilité d'une couverture continue (jour et nuit) sur une base régionale si l'onde ionosphérique est utilisée. Les antennes d'émission tropicales sont construites dans ce but. Néanmoins, la popularité des bandes tropicales est en baisse, même dans les régions tropicales. Aujourd'hui les ondes moyennes et la VHF-FM sont plus populaires en dépit de leurs limitations. Un émetteur en ondes moyennes d'une puissance équivalente est plus cher qu'un émetteur en bandes tropicales, et avec cette puissance, la portée est moins grande à cause du haut niveau de bruit radioélectrique dans les tropiques. La VHF-FM utilise uniquement l'onde ionosphérique, mais à ces fréquences très élevées (100 MHz, 3 mètres), l'ionosphère est incapable de réfléchir le signal. Il en résulte que les antennes VHF-FM doivent toujours être situées en haut de mâts élevés et n'offrent qu'une couverture limitée à "l'horizon optique" (ligne de visée) depuis la position de l'antenne. Mais considérer plus longuement les ondes moyennes et la modulation de fréquence serait sortir du cadre de ce cours, qui a abordé exclusivement la propagation des ondes courtes.

- > **Quels facteurs doivent être pris en considération pour la diffusion en ondes courtes à courte distance?**

REPONSES

Leçon 1.

Une tache solaire apparaît comme une région obscure sur le disque solaire. Il paraît obscure parce que sa température est moins élevée que son environnement. La baisse de la température est provoquée par des champs magnétiques puissants qui crèvent la surface du Soleil.

Leçon 2.

Ce sont les couches D et F₁. La couche E ne disparaît pas complètement.

Leçon 4a.

La fréquence d'opération est généralement choisie entre la FMU (fréquence maximale utilisable) et la FmU (fréquence minimale utilisable). La FOT (fréquence optimale de travail) est généralement définie comme étant 85% de la valeur de la FMU.

Leçon 4b.

Dans les deux cas, il n'y aura pas de réception. Si la fréquence est trop élevée, l'énergie pénètre la couche F₂ et s'échappe dans l'espace. Si elle est trop basse, l'énergie est absorbée au cours du circuit de l'émission.

Leçon 5.

Les variations diurnes (ou quotidiennes) dans l'utilisation des fréquences sont dues à la rotation de la Terre. A cause du passage du jour à la nuit et vice versa, le schéma des couches ionosphériques et du degré d'ionisation de ces couches change aussi. Le choix des fréquences utilisées par les stations d'ondes courtes doit souvent être adapté, par exemple lorsque la différence entre les fréquences du jour et de la nuit est grande. La rotation de la Terre autour du soleil (une révolution par an) est responsable de nos saisons et des variations saisonnières, comme les auditeurs assidus des ondes courtes peuvent le constater.

Leçon 6.

Un émetteur d'ondes courtes dans les tropiques serait souhaitable, car la radiation solaire est plus constante et plus intense que dans les régions polaires. Ceci présente des avantages pour le responsable de la propagation, car il peut choisir des fréquences plus élevées et la plupart peuvent être utilisées pendant toute l'année. Un émetteur situé près de l'équateur lui donne l'avantage d'être plus près des régions cibles qu'un émetteur placé au pôle Sud.

Leçon 7.

Bonaire-San Francisco: les deux points de contrôle peuvent réfléchir des fréquences entre 10 et 15 MHz 50% du temps. Il serait correct de prévoir et d'utiliser 9 MHz comme étant la bande d'ondes courtes la plus appropriée à cette heure, en prenant aussi en considération un mouvement général vers la gauche des diagrammes de lignes fines pendant l'émission. A 1400 TU, le niveau d'ionisation aux points de réflexion a augmenté quelque peu à cause de la rotation de la Terre sur son axe. Ceci peut être vérifié plus ou moins, si vous imaginez que le modèle

de lignes fines de contour se déplace un peu vers la gauche (Figure 9). Une prévision pratique serait de 11 MHz. Deux heures plus tard, la FMU pour ce circuit sera la même que pour celle de Bonaire-New York.

Bonaire-New York: le point de contrôle mutuel est capable de réfléchir des fréquences d'environ 17 MHz. Ici aussi, il y a une multiplication rapide des FMU avec le passage du temps. Nous pensons que 15 MHz serait une bonne bande, mais 11 MHz serait acceptable aussi, bien que celle-ci aura le désavantage d'être sensible au bruit (solaire) une fois que la fréquence se trouvera bien en-dessous de la FMU. A 1400 TU, la situation est beaucoup plus favorable. A cause de la rotation de la Terre, le schéma des lignes hypsométriques se déplace de nouveau vers la gauche (Figure 9) et - comme il fait jour - est seulement quelque peu déformé. Dans ce cas, le mouvement de deux heures est 1/12 de la circonférence de la Terre, et par conséquent 1/12 de la largeur de la figure. Le point de contrôle C pour le circuit Bonaire-New York sera alors supérieur à 25 MHz et à la fréquence prévue de 21 MHz.

Leçon 8.

Consultez votre dernier exemple pour le circuit Maroc-Singapour pendant la saison de l'équinoxe avec une activité solaire moyenne. Dans notre question, l'activité solaire a atteint son minimum et la saison n'est pas favorable non plus: les deux points de contrôle se trouvent dans l'obscurité. En conséquence, notre prévision sera 6 ou 7 MHz.

Leçon 9.

La FmU (fréquence minimale utilisable) est déterminée par l'absorption sur le circuit de l'émetteur au récepteur. L'absorption peut être évitée avec des émetteurs plus puissants mais pas toujours. L'absorption a tendance à augmenter avec la longueur du circuit de transmission et lorsque la liaison a lieu (partiellement) pendant la journée. Une activité solaire intense tend aussi à augmenter la FmU, ainsi que la focalisation ou la défocalisation. Lorsque la FmU d'un certain circuit dépasse la FMU, la réception en ondes courtes devient impossible.

Leçon 10.

Le genre de fading le plus fréquent est le fading par interférence. Les autres types sont: le fading sélectif, le fading par bond, le fading par flottement, et le fading par polarisation.

Leçon 11.

Les orages ionosphériques et les perturbations ionosphériques soudaines. Les orages ionosphériques peuvent durer plusieurs heures voire plusieurs jours, tandis que les perturbations ionosphériques soudaines ont une durée de quelques minutes à plusieurs heures.

Leçon 12.

Une fréquence basse en ondes courtes, une antenne qui irradie verticalement, une zone de fading, et une fréquence de transmission qui peut être captée par les récepteurs dans la région.